

Universidade do Minho
Escola de Engenharia

Serafim da Hora Coito

Definição de parâmetros a usar num processo de soldadura para melhoria da qualidade do produto

Tese de Mestrado

Mestrado em Engenharia e Gestão da Qualidade

Trabalho efetuado sob a orientação de

Sérgio Dinis Teixeira de Sousa

Julho de 2016

DECLARAÇÃO

Nome:

Serafim da Hora Coito

Título da dissertação:

Definição de parâmetros a usar num processo de soldadura para melhoria da qualidade do produto

Orientadores:

Sérgio Dinis Teixeira de Sousa

Ano de conclusão: 2016

Designação do Mestrado:

Mestrado em Engenharia e Gestão da Qualidade

DE ACORDO COM A LEGISLAÇÃO EM VIGOR, NÃO É PERMITIDA A REPRODUÇÃO DE QUALQUER PARTE DESTA TESE/TRABALHO

Universidade do Minho, ____/____/____

Assinatura:

AGRADECIMENTOS

Começo começar por agradecer aos meus familiares diretos pela motivação, compreensão, amor, carinho e dedicação que demonstraram ao longo desta fase apoiando-me e incentivando-me para a realização desta dissertação.

Agradeço também ao professor e orientador desta dissertação o Dr. Sérgio Dinis Teixeira de Sousa, por me ter aceitado e orientado ao longo da realização desta dissertação, sempre encontrando uma forma de me motivar para a concluir.

À Escola de Engenharia da Universidade do Minho, casa à qual conheci pela primeira vez para completar mais uma etapa da minha vida, pela facilidade e disponibilidade que sempre demonstraram algo inédito em instituições públicas. Quero agradecer ao Eng. David Karim pela compreensão e disponibilidade oferecida para a realização desta dissertação, facultando-me as ferramentas necessárias para a concretização deste passo, que mais uma vez souberam valorizar a mais valia académica numa era altamente conturbada motivada quase exclusivamente pela valorização económica das pessoas.

Por último, quero agradecer a todos os que direta ou indiretamente me ajudaram a vencer os desafios, dando-me acesso a literatura com a única motivação digna da pura amizade.

Obrigado a todos.

RESUMO

A globalização do mundo industrial e os novos contornos das pressões competitivas constituem um desafio para a indústria da metalomecânica. A indústria metalomecânica e, especialmente aquela ligada a processos de soldadura em tubagens para a indústria petrolífera, procura constantemente formas de controlar os seus métodos e procedimentos de soldadura com o objetivo de reduzir os custos ao minimizar as reparações por deficientes aplicações dos parâmetros usados aquando das soldaduras.

Face à necessidade de realizar soldaduras, reparações e ligações em tubagens usadas na indústria petroquímica, tornou-se vantajoso a execução destes trabalhos com a qualidade necessária por forma a se evitar reparações, cortes nas tubagens, emendas, etc. Tal implica a execução da soldadura na tubagem em aço carbono de modo a manter o conjunto estanque para a máxima pressão de operação.

Esta dissertação aborda os problemas relacionados com os diversos parâmetros identificados na operação de soldadura TIG que influenciam a qualidade da mesma, baixando o risco de intervenções futuras, potencialmente perigosas.

Nela são abordadas dois aspetos fundamentais para a integridade dos materiais após as operações de soldadura, a entrega térmica e os valores de durezas do material.

Para validar as diversas práticas operativas destinadas a minimizar o impacto destes dois fatores, foram efetuados vários ensaios para verificação dos valores que mais afetam a entrega térmica, e dureza. Finalmente, elaboraram-se tabelas destinadas a diminuir a incidência dos problemas identificados.

Palavras-chave

Intensidade da corrente elétrica, melhoria da qualidade, Procedimentos de soldadura, Soldadura TIG, tensão da corrente, velocidade de soldadura,

ABSTRACT

The globalization of the industrial world and the new approaches of competitive pressures are a challenge for the metal industry.

The metal industry and especially those linked to welding processes in pipes for the oil industry is constantly seeking ways to control their methods and welding procedures in order to reduce costs by minimizing repairs due to incorrect application of the parameters used during the welding.

Given the need for welding, repairs and connections in pipes used in the petrochemical industry, it has become advantageous to the execution of these works with the necessary quality in order to avoid repairs, cuts in pipes, amendments, etc.

This involves performing welding on carbon steel pipes to maintain the assembly for the maximum operating pressure.

This Master thesis addresses the issues related to the various parameters identified in TIG welding operation that influence the quality of it, lowering the risk of future interventions, potentially dangerous.

Two fundamental aspects to the integrity of the materials after welding operations, the “heat input” and “hardness values” of the material.

To validate the different operating practices to minimize the impact of these two factors were carried out several tests to check the values that most affect the heat input and hardness. Finally, they elaborated up tables designed to reduce the incidence of problems identified.

KEYWORDS

TIG welding, intensity of electric current, intensity of voltage, speed welding, welding procedures.

ÍNDICE

Agradecimentos.....	iii
Resumo.....	iv
Abstract.....	v
Keywords	v
Índice	vi
Índice de Figuras	viii
Índice de Tabelas	ix
Lista de Abreviaturas, Siglas e Acrónimos.....	x
1. Introdução	1
1.1. Enquadramento	1
1.2. Objetivos.....	3
1.3. Estrutura da dissertação.....	3
2. Revisão da Literatura.....	4
2.1. Métodos de controlo.....	4
2.2. Soldadura TIG	7
3. Caracterização e enquadramento do problema.....	9
3.1. Perspetiva geral da organização Amal.....	10
3.2. Caracterização do sistema de controlo.....	13
3.3. Caracterização do problema	13
3.4. A qualidade da soldadura	14
3.5. Controlo não destrutivo	15
4. Caso de Estudo	17
4.1. Caracterização estudo	18
4.2. Ensaios.....	18
4.3. Procedimento de Soldadura.....	20
4.3.1. Preparação dos provetes	20
4.3.2. Entrega térmica.....	21
4.4. Análise dos dados e resultados.....	22
4.4.1. Defeitos detetados após os ensaios	33
5. Design of experiments.....	35
5.1. Método Taguchi	36

5.2.	Experimentações / provas.....	37
6.	Conclusão.....	41

ÍNDICE DE FIGURAS

Figura 1 - Representação da Soldadura TIG.....	2
Figura 2 – Ensaio: Líquidos Penetrantes	5
Figura 3 – Ensaio partículas magnéticas	5
Figura 4 – Fonte raio X	6
Figura 5 – Fonte raio Gama	6
Figura 6 – Tanque armazenamento de hidrocarbonetos	11
Figura 7 – Construção modular.....	11
Figura 8 – Fabrico de tubagem	11
Figura 9 – Fluxograma do processo de fabrico da tubagem	12
Figura 10 - Diagrama de Ishikawa para defeitos na soldadura TIG	15
Figura 11 – Resultado radiográfico aos cordões soldadura	16
Figura 12 – Esquema da folga na soldadura	19
Figura 13 – Verificação das durezas.....	19
Figura 14 – Diagrama de dispersão entre Intensidade de corrente e Entrega Térmica	29
Figura 15 – Diagrama de dispersão entre Voltagem e Entrega Térmica.....	30
Figura 16 – Diagrama de dispersão entre velocidade e Entrega Térmica.....	31
Figura 17 - velocidade > 95 e Entrega Térmica.....	32
Figura 18 - velocidade > 120 e Entrega Térmica.....	32
Figura 19 - Gráfico de defeitos	34

ÍNDICE DE TABELAS

Tabela 1 – Capacidade produtiva da empresa	10
Tabela 2 – Resultados experimentais de dureza e entrega térmica	22
Tabela 3 – Condições em que o resultado da soldadura cumpre os requisitos	28
Tabela 4 - Matriz L9 (permite estudar até 4 fatores com 3 níveis cada)	37
Tabela 5 – Definição de 3 níveis para cada fator de controlo	38
Tabela 6 – Fatores controlo e valores resposta	38

LISTA DE ABREVIATURAS, SIGLAS E ACRÓNIMOS

AC – Sigla em Inglês para corrente alterna

DC – Sigla em Inglês para corrente contínua

ET – Entrega Térmica

SST -Stainless Steel

TIG - sigla em inglês de Tungsten Inert Gas

ZTA - zona termicamente afetada (é definida como sendo toda a região vizinha duma soldadura onde as temperaturas de pico foram superiores a um valor, acima do qual existem transformações de carácter metalúrgico no material).

1. INTRODUÇÃO

Neste capítulo faz-se o enquadramento do tema do trabalho, da metodologia a ser seguida e dos procedimentos utilizados na organização. São explicados os objetivos e a causa que deram origem ao presente trabalho de investigação.

1.1. ENQUADRAMENTO

A globalização do mundo industrial e os novos contornos das pressões competitivas constituem um desafio para a indústria da metalomecânica.

A indústria metalomecânica e especialmente aquela ligada a processos de soldadura em tubagens para a indústria petrolífera procura constantemente formas de controlar os seus métodos e procedimentos de soldadura no sentido de reduzir os custos ao minimizar as reparações por deficientes aplicações dos parâmetros usados aquando das soldaduras.

Define-se soldadura em engenharia como o procedimento pelo qual duas ou mais peças de metal se unem por aplicação de calor, pressão, ou uma combinação de ambos, com ou sem adição de outro metal, cuja temperatura de fusão é inferior à das peças que se têm de soldar.

É reconhecido que existem duas razões primordiais de preocupação na soldadura em carga em tubagens que se encontram pressurizadas com hidrocarbonetos: a primeira reside no risco de perfuração da tubagem devido à perda de resistência mecânica por efeito do ciclo térmico de soldadura, que conjuntamente com a pressão interna do fluido pode originar o colapso da parede e uma segunda por fissuração devida à presença de hidrogénio, já que as soldaduras efetuadas em carga arrefecem a uma taxa acelerada em resultado do calor removido pelo fluido que circula no interior da respetiva tubagem.

Existem vários tipos de soldadura, cada um deles com as suas características tecnológicas. Porém devido aos diversos tipos esta dissertação baseia-se apenas no controlo de parâmetros da soldadura TIG (Tungsten Inert Gas).

A soldadura TIG (Figura 1) é um processo de soldadura a arco elétrico, criado entre um eletrodo não consumível de tungstênio e o material a soldar, envolto numa proteção gasosa. Essa proteção gasosa é constituída por um gás inerte - hélio (he) ou argon (ar).

Este processo de soldadura é influenciado por diversos parâmetros, que podem ter influência na produtividade e qualidade da soldadura. Esses parâmetros podem ser facilmente alteráveis no início do processo de soldadura, como por exemplo a intensidade de corrente elétrica, tensão, tipo de eletrodo e tipo de gás, ou seja podem ser considerados como parâmetros de *setup* do processo. Outros parâmetros, como a velocidade de soldadura, dependem do modo de realização da soldadura, ou seja, dependem da perícia do soldador.

A finalidade do gás consiste em evitar a oxidação das partes a soldar.

Como não é possível impedir a oxidação exterior, a tubagem é submetida a posteriori a um tratamento de superfície, denominada passivação, com o objetivo de repor as qualidades mecânicas superficiais iniciais do material.

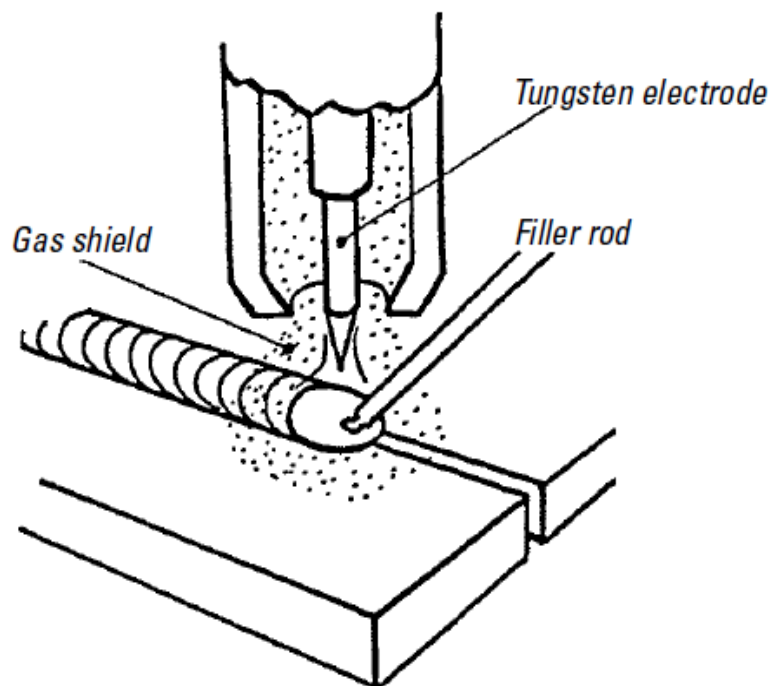


Figura 1 - Representação da Soldadura TIG.

1.2. OBJETIVOS

Os principais objetivos desta dissertação são:

Definir um sistema que permita identificar de forma expedita os parâmetros a colocar nas máquinas soldadura TIG.

Desenvolver uma tabela para ajuda aos soldadores.

Implementar e avaliar a solução desenvolvida.

1.3. ESTRUTURA DA DISSERTAÇÃO

Para além da presente introdução, esta dissertação está organizada em quatro capítulos adicionais.

O Capítulo 2 é dedicado a uma breve revisão da literatura. A revisão apresentada aborda os principais temas do trabalho de investigação e serve para ter uma perspetiva sobre o “estado da arte”.

No Capítulo 3 é desenvolvido o levantamento geral da situação da empresa, os processos implementados, as políticas de qualidade e toda a envolvente que têm influência no desempenho do processo em análise e na empresa no seu todo.

No Capítulo 4 é apresentado o projeto e está descrita a fase de análise e utilização das ferramentas utilizadas durante o processo de investigação que deram origem a um conjunto de medidas propostas.

No Capítulo 5 faz-se a proposta de aplicação do Método de Taguchi ao problema em estudo

Finalmente, nas Conclusões, apresentam-se e discutem-se as principais conclusões bem como um conjunto de sugestões que compreendem medidas a ser implementadas em trabalhos futuros.

2. REVISÃO DA LITERATURA

2.1. MÉTODOS DE CONTROLO

As empresas cuja atividade central seja a da soldadura, habitualmente não controlam os seus processos através de métodos estatísticos definidos, mas sim por experimentação com alterações pontuais de variáveis sem base estatística. Assim, o controlo da soldadura fica dependente das circunstâncias pontual e nunca decorrente de um estudo científico.

Embora os métodos estatísticos possam ser aplicados a todos os processos industriais, no controlo da soldadura versam sobretudo durante a fabricação da matéria-prima (tubos). Castro (1999) aborda as potencialidades de utilização do método Taguchi, a um processo de controlo, a aplicar ao controlo da fabricação de tubos. Igualmente, Banker et al. (2014) abordam a implementação de métodos estatísticos na fabricação de tubos, mas dirigido também ao controlo de matéria-prima e recorrendo à utilização de cartas de controlo aquando da fabricação desses mesmos tubos, nomeadamente os “sem costura” e “com costura”.

Verifica-se que a utilização dos métodos Taguchi aplicados à melhoria do processo de soldadura, não está muito difundida na área da metalomecânica, pelo que o estudo deste método com o fim de melhorar a qualidade final de uma soldadura, nomeadamente o controlo da variável que é o soldador se torna cada vez mais necessária.

De acordo com ESAB (2016) os métodos atualmente utilizados para controlo da qualidade da soldadura são:

Inspeção visual – Frequentemente o mais fácil, o menos dispendioso e provavelmente, se realizado corretamente, o método mais eficaz de inspeção de soldadura para muitas aplicações.

Deteção de fissuras na superfície – Métodos tais como inspeção por líquido penetrante e inspeção por partículas magnéticas

Líquidos penetrantes (ver exemplo na Figura 2) – é utilizado para detetar discontinuidades a nível superficial nos cordões de soldadura. São utilizados dois líquidos, um normalmente vermelho e um outro de cor branca. O método consiste em fazer penetrar nas superfícies o líquido vermelho. Após a remoção dos excessos de líquido na superfície, utiliza-se o líquido revelador (branco) que “obriga” o vermelho a sair pelas discontinuidades, se existir.

Partículas magnéticas (Figura 3) – consiste em submeter uma peça soldada, a um campo magnético. No caso de se verificar descontinuidades, ou seja a falta de continuidade das propriedades magnéticas do material, as mesmas irão causar um campo de fuga no fluxo magnético e assim detectar-se as eventuais descontinuidades.



Figura 2 – Ensaio: Líquidos Penetrantes



Figura 3 – Ensaio partículas magnéticas

Inspeção de soldadura radiográfica e ultrassónica (Figura 4) – Métodos conhecidos como ensaios não destrutivos e utilizados tipicamente para examinar a estrutura interna da soldadura para determinar a sua integridade sem destruir o componente soldado. Este método consiste em efetuar radiografias aos cordões de soldadura, quer através de fonte de raios X ou fontes de raios gama (Figura 5), sendo que os efetuados com raio X possuam melhor resolução.



Inspeção radiográfica de soldas em tubos

Figura 4 – Fonte raio X

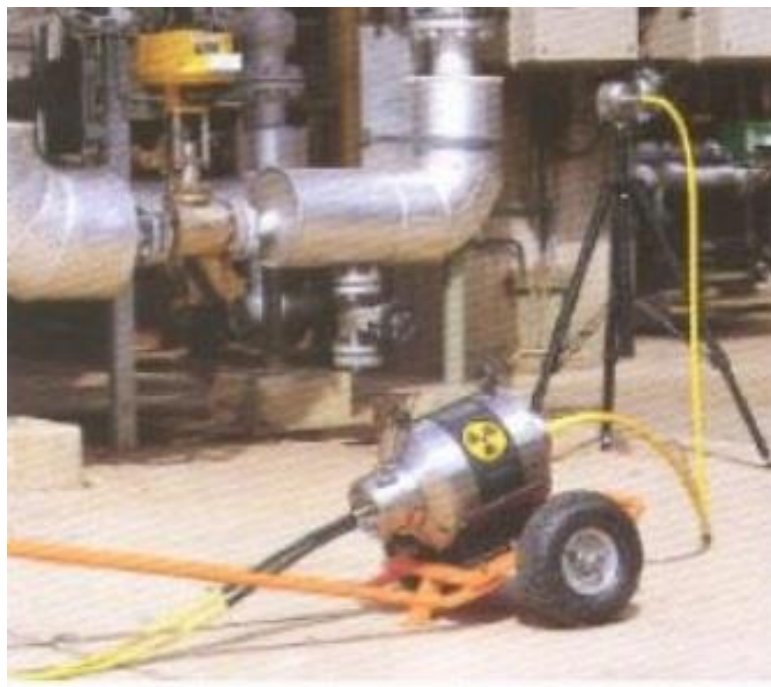


Figura 5 – Fonte raio Gama

Ensaio de soldadura destrutivo – Métodos utilizados para determinar a integridade ou desempenho da soldadura, tipicamente através de seccionamento e/ou quebra do componente soldado e avaliando várias características mecânicas e/ou físicas.

2.2.SOLDADURA TIG

Segundo ESAB (2016), a soldadura TIG é um processo que utiliza um eletrodo sólido de tungstênio não consumível. O eletrodo, o arco e a área em volta da poça de fusão da solda são protegidos por uma atmosfera protetora de gás inerte, normalmente argon.

A soldagem TIG produz uma solda limpa e de alta qualidade. Como não é gerada escória, a probabilidade de inclusão da mesma no metal de solda é minimizada, mas não completamente eliminada. Normalmente a soldadura não necessita de limpeza no final do processo.

A soldadura TIG pode ser usada para quase todos os metais e o processo pode ser manual ou automático.

A soldagem TIG é frequentemente utilizada para solda com alumínio e com ligas de aço carbono e inoxidáveis onde a integridade da soldadura é importante. É também utilizada para juntas de alta qualidade em indústrias nucleares, químicas, aeronáuticas e alimentares.

As vantagens da soldadura TIG são (ESAB, 2016):

- ✓ Solda inúmeras ligas metálicas (aço, níquel, inoxidáveis, titânio, alumínio, magnésio, cobre, bronze e até mesmo ouro);
- ✓ Bom controle da penetração;
- ✓ Ótimo acabamento
- ✓ Uso de AC e DC;
- ✓ Solda em todas as posições;
- ✓ Boa acessibilidade;
- ✓ Baixos níveis de hidrogênio;
- ✓ Possibilidade de soldagem de chapas muito finas
- ✓ Sem escória.

As desvantagens da soldadura TIG (ESAB, 2016) são:

- ✓ Necessidade de maior coordenação e experiência do soldador;
- ✓ Taxa depósito muito baixa (0.8 Kg/h);
- ✓ Fator operacional de 30%*;
- ✓ Grande sensibilidade à corrente de ar;
- ✓ Necessita de gases de proteção.

(*) – de acordo com controlo de tempos e eficiência, apenas 30% do tempo utilizado pelo soldador é utilizado em soldadura propriamente dita. O resto do tempo, resultam de tempos de espera para que o tubista “alinhe e oriente” a tubagem, preparação e limpeza dos chanfros, inspeção, ensaios, etc.

Os fatores de origem mecânica e/ou elétrica que mais afetam a qualidade de uma soldadura são a intensidade de corrente, a tensão, o ciclo térmico e a extensão soldada durante o processo de soldadura. É reconhecido que existem duas razões de preocupação na soldadura em tubagens que se encontram pressurizadas com Hidrocarbonetos, considerando a preocupação fundamental desta dissertação em definir os parâmetros corretos para soldaduras utilizadas essencialmente em refinarias.

1. risco de perfuração da tubagem devido à perda de resistência mecânica por efeito do ciclo térmico de soldadura, que conjuntamente com a pressão interna do fluido pode originar o colapso da parede e
2. fissuração devida à presença de Hidrogénio, já que as soldaduras efetuadas em carga arrefecem a uma taxa acelerada em resultado do calor removido pelo fluido que circula no interior da respetiva tubagem.

Assim, podem-se alterar parâmetros e materiais de soldadura.

Estes problemas podem ser detetados através de diversos métodos: através da verificação das durezas obtidas na zona termicamente afetada (ZTA), aquando da realização de soldaduras circunferenciais na parede exterior, inferindo a ligação das temperaturas atingidas com a diminuição da sua resistência mecânica (tensão de cedência) e consequente rotura, mais concretamente os valores de durezas obtidas nos materiais e na zona denominada de termicamente afetada, devida à temperatura atingida durante a soldadura.

3. CARATERIZAÇÃO E ENQUADRAMENTO DO PROBLEMA

A organização sobre a qual este trabalho de investigação incide é a Amal Construções Metálicas, com sede no lugar de Chão Duro, freguesia da Moita.

Este estudo, justifica-se pelo facto de as questões ao nível da soldadura serem o principal problema, nomeadamente as reclamações de clientes, as reparações durante o processo de fabrico e os custos associados aos mesmos.

Os defeitos de soldadura, se forem ao nível visual, tais como, falta de penetração, queimaduras, respingos são facilmente detetáveis através das inspeções rotineiras efetuadas. Contudo, os defeitos ao nível de poros, incrustações, falta de fusão apenas são detetados com meios de inspeção após a soldura e obviamente são dispendiosos. Estes ensaios/inspeções não são realizados a 100% mas sim com uma percentagem da ordem dos 10% às soldaduras realizadas por cada soldador.

O processo consiste essencialmente no seguinte:

Se uma das soldaduras, daquele soldador, apresenta defeito, as próximas 3 efetuadas pelo soldador são inspecionadas através dos métodos de radiografia e líquidos penetrantes. Se nenhum defeito for encontrado nessas 3 soldaduras, o soldador prossegue o trabalho normalmente. Se uma dessas 3 soldaduras apresentar defeito, as próximas 6 serão objeto de ensaios radiográficos. Facilmente se compreende que a probabilidade de neste processo a existência de soldaduras defeituosas não serem detetadas é elevada.

Como as máquinas de soldar permitem várias combinações de parâmetros (intensidade de corrente e voltagem), aliadas à variável dificilmente controlável, ou seja, a velocidade de deslocamento introduzida pelo operador, pretende-se assim, determinar quais os melhores valores para as variáveis das máquinas, e se possível até, bloquear, e indicar ao soldador qual a velocidade de deslocamento recomendado, ou seja o resultado do tamanho do cordão de soldadura e o tempo durante o qual o executa.

3.1. PERSPETIVA GERAL DA ORGANIZAÇÃO AMAL

A empresa dedica-se essencialmente a produzir/construir de tanques de armazenagem e equipamentos sob pressão, Redes de fluídos (pré-fabrico e montagem), Estruturas metálicas especiais (fabrico e montagem) e Construção de Módulos *onshore* e *offshore*

As capacidades produtivas da empresa, são apresentadas na Tabela 1.

Tabela 1 – Capacidade produtiva da empresa

Unidade fabril	Área Fabril	Redes Fluídos (pol/mês)	Tanques Armazenagem (Ton/mês)	Estruturas Metálicas (Ton/mês)
AMAL – Construções Metálicas, SA (situada em Chão Duro - Moita)	40000 m ²	20.000	700	450
AMAL – Construções Metálicas, SA (situada em Sines)	15000 m ²	20.000	600	350
AMAL – Construções Metálicas, SA (situada em Setúbal)	25000 m ²	60.000	300	200

Tradicionalmente na fabricação de redes de fluídos a capacidade de produção baseia-se no número de polegadas diamétrais soldadas, tendo por base um diâmetro de 6 polegadas e uma espessura de parede de 3 mm.

Esta organização possui um historial de ações que têm vindo a refinar e amadurecer a cultura de qualidade patente na sua ação. Exemplo disso mesmo são as certificações sob a norma ISO 9001, NP 4397:2008, MASE/UIC e ASME (*stamps* S e U).

Apresentam-se nas Figuras 6, 7 e 8 alguns exemplos de trabalhos efetuados na organização



Figura 6 – Tanque armazenamento de hidrocarbonetos



Figura 7 – Construção modular



Figura 8 – Fabrico de tubagem

A empresa possui uma estrutura organizacional com quatro departamentos:

- Administrativo e Financeiro
- Técnico-Comercial
- Qualidade, Ambiente e Segurança
- Produção

A área técnica que engloba a sala de desenho e de preparação de trabalho encontra-se englobada no departamento técnico – comercial.

Atendendo a que esta dissertação se dedica a estudar a qualidade da soldadura em tubagem usada nas redes de fluidos, indica-se na Figura 9 e de uma forma resumida o procedimento de fabrico e controlo da tubagem.

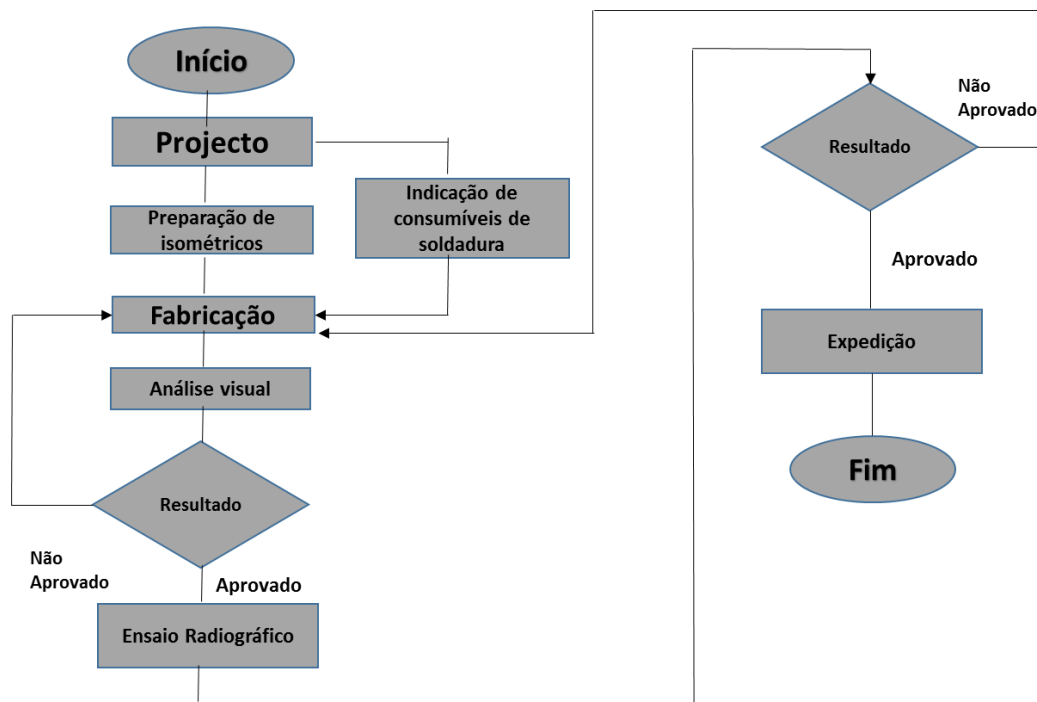


Figura 9 – Fluxograma do processo de fabrico da tubagem

3.2. CARACTERIZAÇÃO DO SISTEMA DE CONTROLO

A Amal tem o seu processo produtivo baseado em processos de soldadura, quer sejam estes em estruturas metálicas quer sejam em tubagem para fluidos.

O processo produtivo está assim, condicionado às solicitações dos mercados e, como tal, aplicar controlos normalmente aplicados às produções em série carecem de números suficientes para se estabelecerem.

Nesta atividade cada caso é um caso e, mesmo na situação de fabricação de tubagem para fluidos, as variações de diâmetros são frequentes, pelo que os controlos aplicados à qualidade da soldadura são individualizados e definidos para cada caso sem fundamentação quantitativa ou histórico de dados. Sempre que se inicia um novo processo, mesmo que as semelhanças com um outro sejam evidentes, a empresa redefine os critérios, com base na experiência pessoal do responsável de produção e do inspetor de soldadura e não com base em estudos estatísticos.

Durante a produção a interação entre o soldador e o inspetor de soldadura é reduzida ao mínimo. O operador sabe dos resultados dos ensaios através do radiologista que terá que refazer determinada soldadura. O soldador ao refazer a soldadura continuará a introduzir na máquina de soldar, os parâmetros que inicialmente tinha introduzido, não sendo realizada uma análise às condições que originaram a reparação.

Este trabalho visa estudar os parâmetros que influenciam a qualidade final de uma soldadura em tubagens usadas na indústria de hidrocarbonetos.

A qualidade final de uma soldadura resulta dos consumíveis utilizados, das parametrizações introduzidas nas máquinas de soldar e da experiência do soldador.

3.3. CARACTERIZAÇÃO DO PROBLEMA

Na soldadura os materiais das peças a serem soldadas devem ser, se possível, iguais, ou no mínimo semelhantes em termos de composição, assim como também o material de adição, que deve ser igual em termos de características.

Diferentes produtos, com diferentes características e diferentes especificações técnicas, poderão ter parâmetros de setup diferentes. Adicionalmente, a perícia técnica do soldador pode afetar a

velocidade de soldadura e a qualidade da mesma. Nalguns casos, podem não estar definidos todos os parâmetros de setup nem estar definido a velocidade máxima de realização da soldadura. Tal poderá resultar em produtos defeituosos (NORMA EN 1011-2-2001).

Estas particularidades são ultrapassadas pelas empresas através de máquinas mais eficientes e com melhor controlo de intensidade e voltagem de corrente, zonas de trabalho delimitadas e estanques tanto possível a correntes de ar, uso de gás árgon com maior grau de pureza, definição de parâmetros de soldadura com indicação clara e precisa dos vários controlos definidos a manter nas máquinas, bem como o uso dos materiais de adição corretos.

Contudo a maior influência reside no operador. Se considerarmos os fatores velocidade/tempo e percurso do cordão de soldadura, estes dependem integralmente da perícia do soldador, pelo que a formação e experiência são os fatores a considerar na atribuição do trabalho a um determinado soldador.

Igualmente são implementados métodos de controlo, não só ao cordão de soldadura em si, mas também ao próprio soldador. Independentemente dos planos de inspeção pré-determinados, cada soldador poderá ser avaliado através das soldaduras efetuadas através dos ensaios radiográficos às soldaduras

3.4.A QUALIDADE DA SOLDADURA

A qualidade da soldadura pode ser avaliada através de testes de impacto e de durezas, além de inspeção visual. No entanto, estes testes não podem ser efetuados em tempo real, devido ao custo elevado e à necessidade de esperar que o material arrefeça, entre outros. Sem uma definição correta, com limites, para os parâmetros passíveis de se alterarem, o resultado pode ser catastrófico ao nível das alterações moleculares dos materiais a soldar (NORMA EN 1011-2-2001).

Assim, a incorreta definição destes parâmetros pode originar produto defeituoso e se não existirem instruções técnicas que definam esta parametrização pode-se incorrer em custos da qualidade (Campanella, 1999).

Foi realizado um diagrama de causa-efeito para estudar os fatores que afetam a qualidade da soldadura, tendo-se obtido o resultado apresentado na Figura 10.

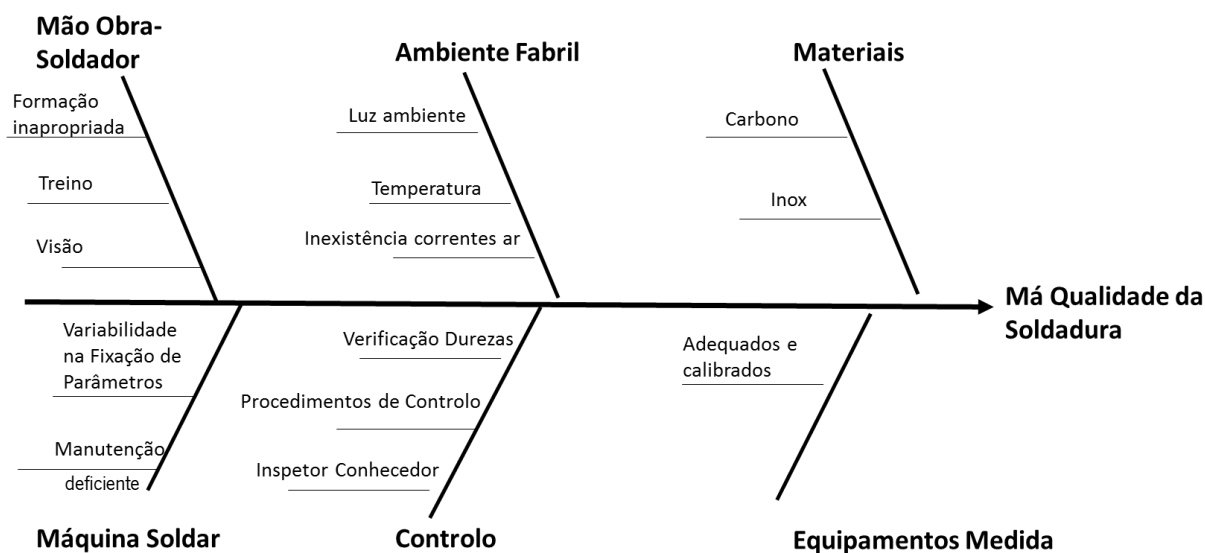


Figura 10 - Diagrama de Ishikawa para defeitos na soldadura TIG

Dos fatores controláveis identificados no diagrama, aquele que sugere maior subjetividade de controlo é o de mão-de-obra, pelo que as ações a definir por forma a se obter uma boa soldadura, deverão incidir essencialmente sobre este fator.

3.5. CONTROLO NÃO DESTRUTIVO

O controlo não destrutivo torna-se assim um instrumento fundamental na avaliação de defeitos e na verificação da qualidade final a efetuar tanto ao material base, assim como às soldaduras efetuadas.

É efetuado um controlo por ensaios de dureza e radiográfico para verificação da qualidade do cordão de soldadura. Estes ensaios realizam-se após a conclusão da soldadura e decorridas 24h minimizando o aparecimento de fissuração a frio. Esta inspeção realizada ao tubo base e à soldadura longitudinal, é poderá ser efetuada utilizando a fonte radioativa RX ou Selénio, como já

anteriormente referido. A Figura 11 apresenta um exemplo de um resultado radiográfico aos cordões de soldadura.

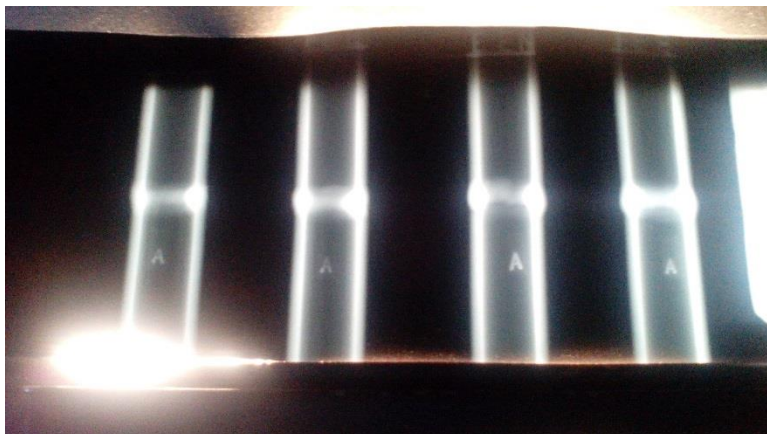


Figura 11 – Resultado radiográfico aos cordões soldadura

4. CASO DE ESTUDO

O presente estudo baseia-se na prática de fabrico de tubagem inox orientada para a indústria petrolífera, mais concretamente para a refinaria da NESTE Oil na cidade de Porvoo (Finlândia). O processo chave em estudo será a soldadura da tubagem.

Para melhorar a qualidade deste processo e reduzir os custos associados, aumento de produtividade e redução de rejeições, torna-se necessário um estudo estatístico para fazer uma caracterização apropriada da influência de algumas das variáveis da soldadura (denominadas neste trabalho de "fatores de controlo") sobre as características dos materiais a soldar – alterações na estrutura do material na zona termicamente afetada (ZTA) e determinar as condições ideais a aplicar nos parâmetros das máquinas de soldar TIG. Serão efetuados estudos estatísticos que permitirão adequar as condições de *setup* aos materiais em causa.

Assim, existe a necessidade de definir parâmetros de soldadura, mas tal não deve ser restrito a um valor fixo mas a intervalos para poder, desta forma, adequar-se a soldadores com diferentes níveis de perícia. Estes parâmetros não são tabelados em normas pelo que terá que ser a empresa a defini-los. Esta definição deve garantir a qualidade da soldadura, maior produtividade e consequente redução de custos.

Existe assim uma necessidade de definir uma metodologia que possa ajudar as organizações a serem mais competitivas através da melhoria deste processo de soldadura. Tal poderá implicar formação de recursos Humanos, definição de procedimentos ou instruções de trabalho e definição de parâmetros de *setup* ótimos (Ishikawa, 1971)

Neste capítulo vão-se abordar as questões de parametrização inseridas nas máquinas de soldar e estabelecer relações entre as mesmas, determinando quais as relações existentes entre si e verificar quais delas interferem mais profundamente no resultado.

O estudo iniciou-se sem efetivamente uma estratégia científica pré-determinada

4.1. CARACTERIZAÇÃO ESTUDO

O estudo iniciou-se sem uma estratégia pré determinada em termos de introdução de valores de parametrização nas máquinas, ou seja, de acordo com a prática institucionalizada na empresa. Os valores foram estabelecidos com base na experiência passada e de forma aleatória, sem uma base científica que permita definir relações futuras.

O número de ensaios efetuados foi de 134. Todos os ensaios efetuados, foram realizados uma única vez, sem confirmação dos mesmos.

A Tabela 2 contém os dados relativos aos testes realizados. Foram utilizadas as seguintes variáveis controláveis: Intensidade de corrente, Voltagem, dimensão do cordão de soldadura efetuado, tempo durante o qual o soldador efetuou o cordão. Estas duas últimas vão permitir o cálculo da velocidade de deslocamento que será um dos fatores a considerar no cálculo da Entrega Térmica. Foram medidos os seguintes resultados entrega térmica e dureza.

O resultado de cada teste foi comparado com os limites técnicos para os valores de Entrega Térmica. Assim, podem-se identificar combinações de parâmetros que dão resultados fora das especificações.

4.2. ENSAIOS

Os ensaios foram realizados com dois soldadores, cada um possuindo uma máquina com as mesmas características e modelo.

Os ensaios foram baseados em procedimentos de soldadura existentes para materiais equivalentes (diâmetro 4 " Schedule 401).

O estudo realizou-se em tubagem de diâmetro de 6 polegadas e espessura de 0.432 mm. Os tubos foram limpos e chanfrados como se indica na Figura 12.

¹ Termo técnico inglês usado para definição da espessura da parede do tubo: Sch 40 – espessura da parede =0.280 mm; Sch 80 – espessura da parede =0.432 mm

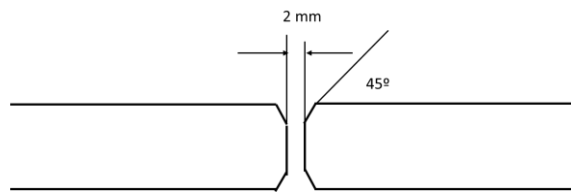


Figura 12 – Esquema da folga na soldadura

Foi garantida a distância de separação de 2mm recomendada para uma boa penetração do material de adição aquando da soldadura.

Os ensaios foram realizados na posição horizontal e os tubos de ensaio fixos à mesa de trabalho.

Todas as soldaduras efetuadas foram radiografadas a 100% e inspecionadas visualmente, após o que foram efetuadas medições aos valores de durezas, nos locais assinalados na figura 13.

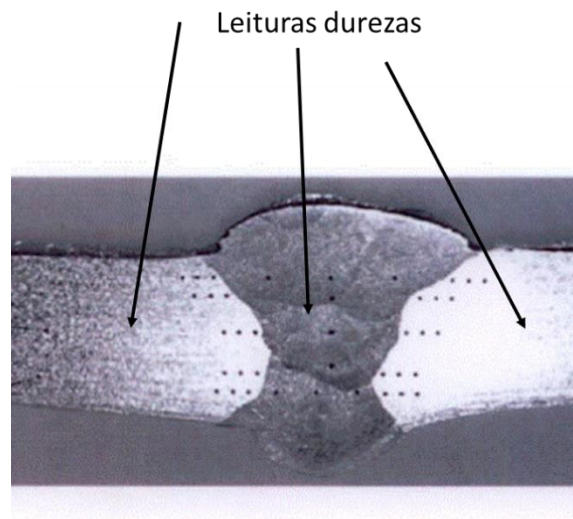


Figura 13 – Verificação das durezas

Aos soldadores foi dada liberdade de optar por qualquer das intensidades de corrente e de tensão.

Para tal contribui a prática e experiência dos soldadores neste género de operações.

4.3. PROCEDIMENTO DE SOLDADURA

4.3.1. PREPARAÇÃO DOS PROVETES

Foi utilizada na preparação dos provetes, tubo de diâmetro de 4 polegadas e “Schedule” 40 o que corresponde a uma espessura da parede de 6.02 mm. Os provetes foram cortadas nas dimensões de 150 mm, visando um melhor aproveitamento do material. A etapa seguinte ao corte foi a realização a remoção de todo o óxido da superfície da peça. Este trabalho foi realizado com o auxílio de uma lixadeira manual com um disco de desbaste de 7” e uma escova de aço rotativa no mesmo diâmetro. Logo após, foram abertos três guias de ± 1 mm de profundidade com utilização da lixadeira e disco de desbaste. Estes guias tem como finalidade guiar o soldador no momento em que o mesmo estiver a soldar, de modo que o cordão de solda permaneça o mais alinhado possível.

Durante os ensaios, a velocidade foi determinada indicando ao soldador qual o tamanho do cordão e o tempo durante o qual solda. Este procedimento justifica-se porque:

1. A entrega térmica é uma função que depende da velocidade de soldadura,
2. Para o soldador torna-se mais intuitivo a indicação de qual o tamanho do cordão deve soldar e o controle do tempo é feito pelo responsável dos testes. A velocidade é posteriormente calculada através da fórmula $v=e/t$ em que e- comprimento do cordão e t – tempo de soldadura do cordão.

Considerando que podem existir fatores de ruído que influenciam o resultado da soldadura relacionados com o ambiente de produção, foi adotado um método para que os mesmos não confundissem os resultados. Assim, foram utilizadas máquinas idênticas (mesmo fabricante Kempf e mesmo modelo), os provetes a utilizar nos ensaios foram retirados da mesma barra, os gases para a soldadura foram obtidos da distribuição geral da fábrica e dos depósitos da Air Liquide situados no exterior à nave de soldadura. Os consumíveis utilizados foram do mesmo fabricante ESAB e da mesma embalagem.

O resultado do processo de soldadura está relacionado com a entrega térmica que será abordada na secção seguinte. A entrega térmica de um processo de soldadura é definida como sendo a quantidade de calor adicionada a um material, por unidade de comprimento linear.

4.3.2. ENTREGA TÉRMICA

O valor da entrega térmica [Q] é dado pela equação (1) (Parágrafo 19 da norma NF EN 1011-1).

$$Q = K \frac{V \times I \times 10^{-3}}{\frac{V}{60}}$$

Onde

Q – entrega térmica (j/mm)

K – Fator definido pela norma NF EN 1011-1

V – Tensão da corrente (volt)

I – Intensidade da corrente (ampere)

v - velocidade de deslocamento (mm/s)

A entrega térmica depende, portanto, não só do processo de soldadura utilizado (através da potência da fonte e eficiência de transferência), mas também da técnica que se utiliza (através da velocidade de deslocamento). Quanto maior for a entrega térmica, maior será a quantidade de calor transferida para a peça de trabalho, maior será o banho de fusão, mais extensa a zona termicamente afetada.

Qualquer variação na entrega térmica depende da velocidade de soldadura utilizada, o que pode ser conseguido com diferentes técnicas.

A velocidade de deslocamento define-se como sendo o comprimento linear de solda executado em cada passe por unidade de tempo. As técnicas de soldadura que executem cordões finos têm uma velocidade de deslocamento elevada e consequentemente menor entrega térmica.

A entrega térmica é também várias vezes confundida com a intensidade da corrente. A intensidade da corrente é, uma das principais características que ajuda a distinguir os diferentes processos de soldadura, mas trata-se apenas de um parâmetro que pode influenciar, através da intensidade utilizada pela fonte de calor, mas não definir completamente a entrega térmica.

4.4. ANÁLISE DOS DADOS E RESULTADOS

Os ensaios foram executados na nave de inox da AMAL aquando do projeto refinaria de Porvoo, de forma aleatória e os resultados de resposta são apresentadas na Tabela 2.

Tabela 2 – Resultados experimentais de dureza e entrega térmica

						Q=[1-25% a 1+25%] Parágrafo 19 da norma NF EN 1011-1		Valores requeridos ≤ 248 (asme 31.3)	
Nº amostra	Amperagem (I)	Voltagem (V)	Tempo (Δt seg)	Comprimento percorrido	Velocidade (mm/min)	Q (entrega térmica) KJ/mm	0,8	1,25	Durezas
1	57	8,4	199	100	30	0,77			
2	57	8,4	180	100	33	0,7	erro		
3	57	8,4	194	100	31	0,74	erro		
4	57	8,4	207	100	29	0,79			
5	57	8,4	100	45	27	0,85			
6	57	8,4	153	85	33	0,7	erro		
7	73	8,9	172	110	38	0,82			186
8	73	8,9	187	130	42	0,74	erro		197
9	73	8,9	193	155	48	0,65	erro		206
10	73	8,9	173	150	52	0,6	erro		189
11	57	8,4	128	60	28	0,82			194
12	57	8,4	147	80	33	0,7	erro		186
13	57	8,4	87	50	34	0,68	erro		197
14	57	8,4	165	60	15	1,53		erro	206
15	57	8,4	152	70	28	0,82			
16	57	8,4	140	65	28	0,82			
17	57	8,4	182	100	33	0,7	erro		

Tabela 2 – Resultados experimentais de dureza e entrega térmica (continuação)

						Q=[1-25% a 1+25%] Parágrafo 19 da norma NF EN 1011-1		Pági ≤ 248 (asme 31.3)	
Nº amostra	Amperagem (I)	Voltagem (V)	Tempo (Δt seg)	Comprimento percorrido	Velocidade (mm/min)	Q (entrega térmica) Kj/mm	0,75	1,25	Durezas
18	57	8,4	199	90	27	0,85			
19	75	8,9	181	120	40	0,8			201
20	76	8,9	162	140	52	0,62	erro		199
21	75	8,9	199	155	47	0,68	erro		189
22	75	8,9	196	150	46	0,7	erro		180
23	86	9	154	95	37	1,05			
24	86	9	190	115	36	1,08			
25	86	9	168	115	41	0,95			
26	86	9	95	50	32	1,21			
27	107	10	219	140	38	1,32		erro	
28	107	9	126	140	67	0,72	erro		
29	107	9	98	120	73	0,66	erro		
30	107	9	107	135	76	0,64	erro		
31	116	10	83	120	87	0,61	erro		226
32	116	10	87	90	62	0,85			210
33	116	10	82	125	91	0,58	erro		210
34	116	10	108	130	72	0,73	erro		193
35	82	24	25	50	120	0,77			
36	79	23	30	50	100	0,87			
37	79	23	28	50	107	0,82			
38	93	25	54	110	122	0,9			
39	76	23	28	50	107	0,78			
40	78	24	27	40	89	0,99			
41	78	24	20	60	180	0,49	erro		

Tabela 2 – Resultados experimentais de dureza e entrega térmica (continuação)

						Q=[1-25% a 1+25%] Parágrafo 19 da norma NF EN 1011-1	Valores requeridos ≤ 248 (asme 31.3)		
Nº amostra	Amperagem (I)	Voltagem (V)	Tempo (Δt seg)	Comprimento percorrido	Velocidade (mm/min)	Q (entrega térmica) Kj/mm	0,75	1,25	Durezas
42	95	24	50	90	108	1,01			
43	95	24	29	80	166	0,66	erro		
44	76	24	30	50	100	0,88			
45	77	24	24	40	100	0,89			
46	76	25	30	40	80	1,12			
47	76	23	23	40	104	0,81			
48	95	25	54	100	111	1,03			
49	78	24	45	80	107	0,84			
50	77	24	30	50	100	0,89			
51	77	24	26	45	104	0,84			
52	96	23	51	120	141	0,75			
53	76	23	31	55	106	0,79			
54	77	23	36	50	83	1,02			
55	77	24	28	55	118	0,74	erro		
56	76	23	38	50	79	1,06			
57	95	24	53	100	113	0,97			
58	71	23	31	50	97	0,81			
59	70	23	33	55	100	0,77			
60	70	23	36	50	83	0,91			

Tabela 2 – Resultados experimentais de dureza e entrega térmica (continuação)

						Q=[1-25% a 1+25%] Parágrafo 19 da norma NF EN 1011- 1	Valores requeridos ≤ 248 (asme 31.3)		
Nº amostra	Amperagem (I)	Voltagem (V)	Tempo (Δt seg)	Comprimento percorrido	Velocidade (mm/min)	Q (entrega térmica) Kj/mm	0,75	1,25	Durezas
61	93	24	60	125	125	0,86			
62	79	24	59	80	81	1,12			
63	82	23	59	85	86	1,05			
64	81	23	63	95	90	0,97			
65	86	24	34	50	88	1,13			
66	86	24	64	70	66	1,5		erro	
67	91	24	59	80	81	1,29		erro	
68	90	24	50	75	90	1,15			
69	85	24	27	55	122	0,8			
70	82	23	48	90	113	0,8			
71	81	23	58	90	93	0,96			
72	89	23	55	100	109	0,9			
73	91	23	27	55	122	0,82			
74	82	23	61	95	93	0,97			
75	82	23	57	105	111	0,82			
76	93	24	48	100	125	0,84			
77	83	23	61	85	84	1,09			
78	83	23	60	100	100	0,92			
79	92	24	56	110	118	0,9			
80	83	23	57	90	95	0,96			
84	85	23	57	65	68	1,38		erro	
85	73	23	34	65	115	0,69	erro		
86	73	23	25	50	120	0,66	erro		
87	80	24	26	75	173	0,52	erro		
88	81	23	27	50	111	0,81			

Tabela 2 – Resultados experimentais de dureza e entrega térmica (continuação)

						Q=[1-25% a 1+25%] Parágrafo 19 da norma NF EN 1011-1	Valores requeridos ≤ 248 (asme 31.3)		
N° amostra	Amperagem (I)	Voltagem (V)	Tempo (Δt seg)	Comprimento percorrido	Velocidade (mm/min)	Q (entrega térmica) Kj/mm	0,75	1,25	Durezas
89	81	23	28	55	118	0,76			
90	81	23	32	55	103	0,87			
91	81	23	35	70	120	0,75	erro		
92	81	23	15	40	160	0,56	erro		
93	76	23	33	60	109	0,77			
94	84	23	48	89	111	0,84			
95	89	24	59	100	102	0,98			
96	78	23	55	100	109	0,79			
97	92	23	59	115	117	0,87			
98	92	23	45	110	147	0,69	erro		
99	92	23	30	40	80	1,27		erro	
100	89	23	46	60	78	1,26		erro	
101	89	23	59	90	92	1,07			
102	89	23	23	45	117	0,84			
106	90	24	36	80	133	0,78			
107	88	24	20	45	135	0,75			
108	83	23	56	95	102	0,9			
109	84	23	39	70	108	0,86			
110	89	23	50	100	120	0,82			
111	82	23	52	90	104	0,87			
112	85	24	65	110	102	0,94			
113	92	24	54	90	100	1,06			
114	82	23	60	100	100	0,91			
115	82	23	53	90	102	0,89			
116	92	24	59	120	122	0,87			

Tabela 2 – Resultados experimentais de dureza e entrega térmica (continuação)

						Q=[1-25% a 1+25%] Parágrafo 19 da norma NF EN 1011-1	Valores requeridos ≤ 248 (asme 31.3)		
Nº amostra	Amperagem (I)	Voltagem (V)	Tempo (Δt seg)	Comprimento percorrido	Velocidade (mm/min)	Q (entrega térmica) KJ/mm	0,75	1,25	Durezas
117	83	23	51	90	106	0,86			
118	83	23	61	100	98	0,94			
119	94	24	51	100	118	0,92			
120	83	23	49	80	98	0,94			
121	88	24	60	85	85	1,19			
122	89	23	45	80	107	0,92			
123	90	24	35	70	120	0,86			
124	85	23	52	100	115	0,82			
125	85	23	58	100	103	0,91			
126	90	23	50	100	120	0,83			
127	85	23	44	90	123	0,76			
128	83	23	32	60	113	0,81			
129	84	23	59	110	112	0,83			
130	93	24	50	120	144	0,74	erro		
131	90	10	135	110	49	0,86			
132	85	9	154	95	37	1,03			
133	85	9	233	115	30	1,28		erro	
134	85	9	374	160	26	1,44		erro	

Os valores permitirão indicar aos soldadores quais as parametrizações a introduzir nas máquinas e com os mesmos determinar os valores de Entrega Térmica que se encontram dentro dos limites definidos pela norma. Esta prática, não só é regra na empresa como também é seguida pelas organizações independentes responsáveis pelas qualificações de soldadores.

Pelos resultados, se conclui que o estabelecimento limites inferior e superior a qualquer uma das variáveis, por forma a se obter o melhor resultado nas soldaduras é um método empírico, visto não se determinar qual das variáveis tem maior influência nos resultados finais.

Com os dados obtidos apenas se pode determinar o valor de Entrega Térmica (ET) e verificar se os mesmos se enquadram dentro do recomendado pela norma. Podem-se também estabelecer relações entre um factor de controlo e a ET. Estas relações apenas indicam que existe uma correlação ou não entre o factor de controlo e a ET

Da análise da tabela 2 pode-se concluir que o resultado de determinadas combinações de intensidade, voltagem e velocidade, colocam os valores de ET fora dos limites definidos pela norma. Ou seja:

- Dos 134 ensaios realizados, apenas 97 cumprem o especificado nos requisitos do parágrafo 19 da norma NF EN 1011-1;
- As durezas apenas foram verificadas e de forma aleatória, em 16 dos provetes soldados;
- Dos 16 provetes verificados em relação a durezas, apenas 4 cumprem os requisitos do parágrafo 19 da norma;

Assim podem-se inferir as seguintes condições (Tabela 3) em que o resultado do processo de soldadura cumpre os requisitos técnicos.

Tabela 3 – Condições em que o resultado da soldadura cumpre os requisitos

Amperagem (I)	Voltagem (V)	Tempo (Δt seg)	Comprimento percorrido	Velocidade (mm/min)
73	8,9	172	110	38
57	8,4	128	60	28
75	8,9	181	120	40
116	10	87	90	62

Estas condições não permitem, criar uma tabela de dados para parametrizar as máquinas e assim “ajudar” os soldadores e melhorar qualidade final da soldadura, mantendo a integridade das características do material.

Pode-se concluir que os métodos atuais de definição dos procedimentos de soldadura, nos quais são indicados os balizamentos dos fatores de controlo, não obedecem a técnicas estatísticas bem determinadas, mas sim a métodos empíricos seguindo a cultura “sempre se fez assim”.

Esta prática tem custos na empresa, ao nível das reparações, quando detetadas, e mais grave, em defeitos que possam surgir mais tarde, para além da degradação da imagem da empresa em termos de qualidade, responsabilidade e confiança.

Igualmente se se analisar as inter-relações entre os fatores de controlo e a ET, através de diagramas de dispersão entre variáveis de controlo e a entrega térmica.

Na Figura 14 apresenta-se o diagrama de dispersão entre a Intensidade de corrente e a entrega térmica.

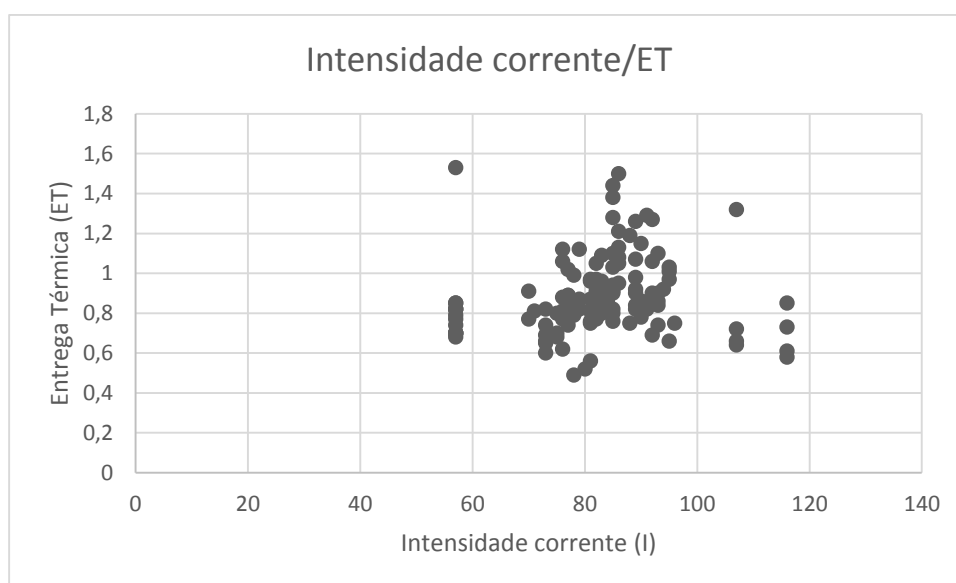


Figura 14 – Diagrama de dispersão entre Intensidade de corrente e Entrega Térmica

Através do gráfico verifica-se que para valores de Intensidade de corrente baixo, valor mínimo considerado nos ensaios de 57 Amperes e valor máximo considerado nos ensaios de 116 Amperes a Entrega Térmica não varia significativamente.

Isto pode-se explicar porque a intensidade influencia bastante a geometria do cordão de soldadura. A penetração da soldadura aumenta com o aumento da corrente e diminui quando a tensão é diminuída, ou seja a variação da intensidade afeta sobretudo as dimensões do cordão de soldadura e não diretamente a entrega térmica.

Igualmente, verifica-se que na zona central do gráfico não existe qualquer correlação entre estes dois fatores.

Fazendo uma análise semelhante entre a voltagem e entrega térmica (Figura 15), verifica-se que o comportamento da entrega térmica assume valores com grande amplitude para valores de Voltagem baixos e para altos, ou seja tanto varia entre os seus limites mínimo e máximo para dois grupos de voltagem testados.

Assim, não se evidencia relação entre a tensão e a entrega térmica.

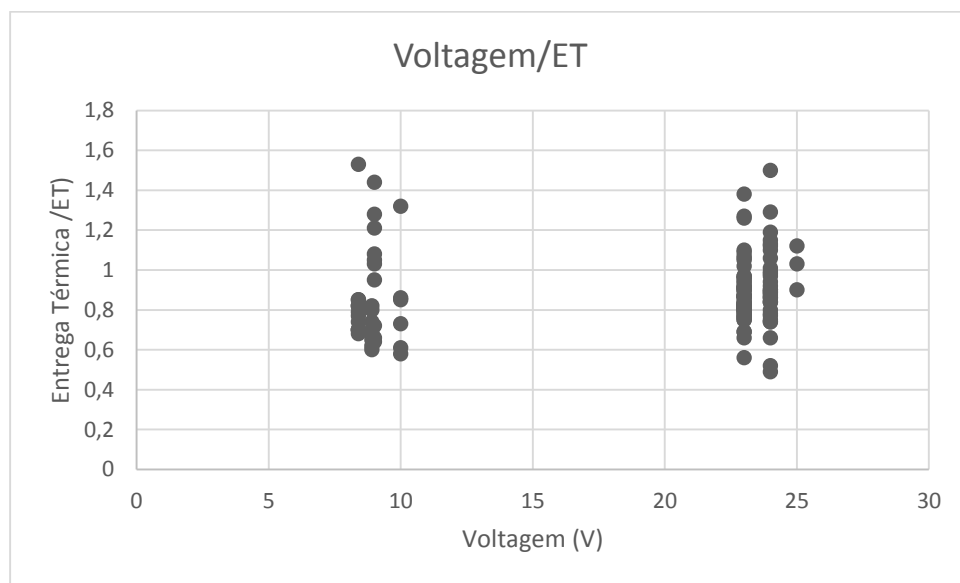


Figura 15 – Diagrama de dispersão entre Voltagem e Entrega Térmica

Por último a relação entre velocidade e entrega térmica é apresentada na Figura 16.

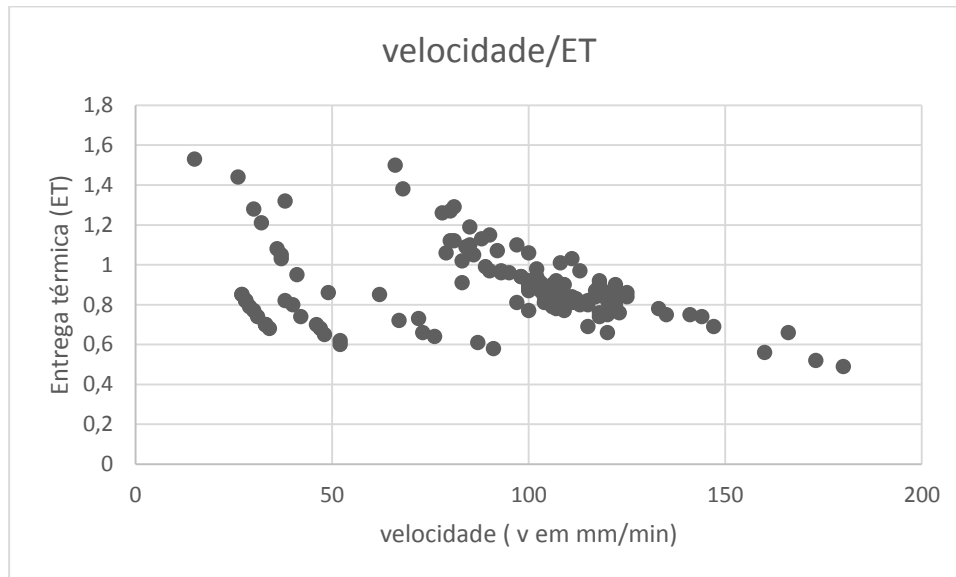


Figura 16 – Diagrama de dispersão entre velocidade e Entrega Térmica

Como primeira observação, parece existir uma relação entre a velocidade e a ET. O gráfico pode-se analisar em duas partes- Para valores de velocidade até 95 mm/min, existem valores elevados e baixos para a ET, ou seja não existe uma correlação entre ambos. Para valores de velocidade acima de 95 mm/min aparenta existir uma relação linear entre a velocidade e a ET. A reta passa pelos pontos (100,1) e (180, 0,5), ou seja a entrega térmica diminui com o aumento da velocidade, mas apenas para velocidades acima de 95mm/min. No entanto, o número de ensaios com velocidade elevada é relativamente baixo pelo que não se irá generalizar esta conclusão.

Poderíamos ainda seleccionar as velocidades acima de 95 e verificar a relação com a entrega térmica

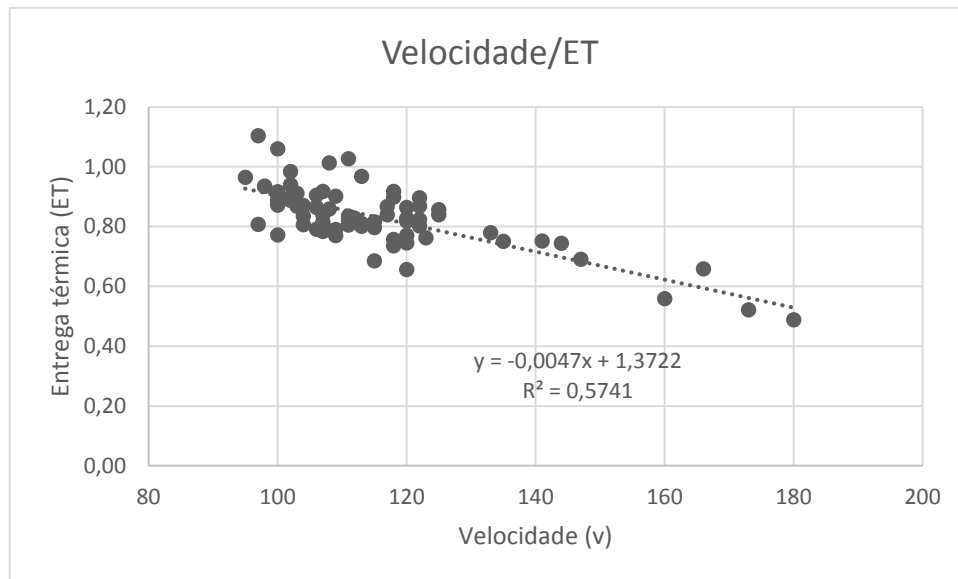


Figura 17 - velocidade > 95 e Entrega Térmica

Face aos resultados não se verifica uma correlação perfeita ($R^2=0,5741$), mas aparenta existir maior relação para velocidades acima dos 100 mm/seg, assim:

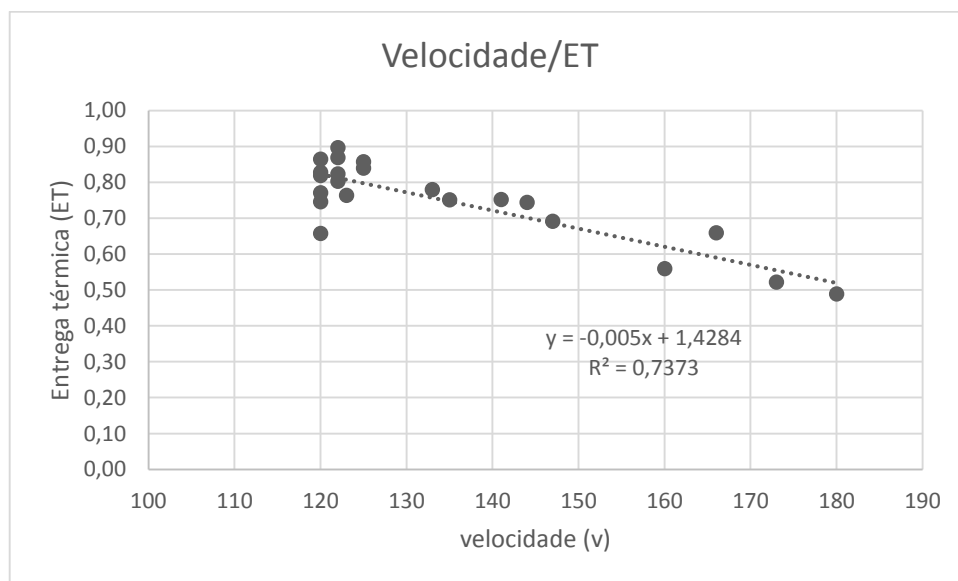


Figura 18 - velocidade > 120 e Entrega Térmica

Ou seja, começa a verificar-se uma relação entre velocidades mais altas e entrega térmica. De facto quando aumentamos a velocidade de soldadura, diminuimos a quantidade de calor nos materiais. De qualquer modo não se podem tirar conclusões examinando um fator de controlo independentemente dos demais. Conclui-se que existe necessidade das empresas que se dedicam a este tipo de trabalho de soldadura de tubagem com características especiais e em aplicações

de elevada complexidade e segurança para instalações, pessoas e zonas vizinhas se consciencializarem de que os métodos científicos e ou estatísticos com provas dadas, são uma ferramenta crucial para o seu desenvolvimento e afirmação no mercado competitivo como o é da indústria dos petróleos (refinarias, plataformas off shore, etc.).

O método recomendado seria o de Taguchi, onde através de combinações estudadas dos diferentes fatores de controlo, se determinava o polinómio que nos iria indicar quais os balizamentos a definir como setup nos equipamentos e assim garantir a melhor qualidade final de soldadura, bem como a probabilidade de ocorrência de defeitos e aumentar a confiança da empresa nos seus produtos, face aos métodos de inspeção não permitirem em termos de custos e de disponibilidade de equipamentos uma verificação radiográfica a 100%.

4.4.1. DEFEITOS DETETADOS APÓS OS ENSAIOS

Dos registos existentes constata-se que a “falta de fusão” e “existência de poros” são os defeitos com maior incidência. Outros existem como impurezas, cordão desalinhado. Contudo, os defeitos falta de fusão e existência de poros são os de maior incidência.

No estudo efetuado a distribuição destes defeitos, diâmetro de tubo soldado estão evidenciados no gráfico da figura 19.

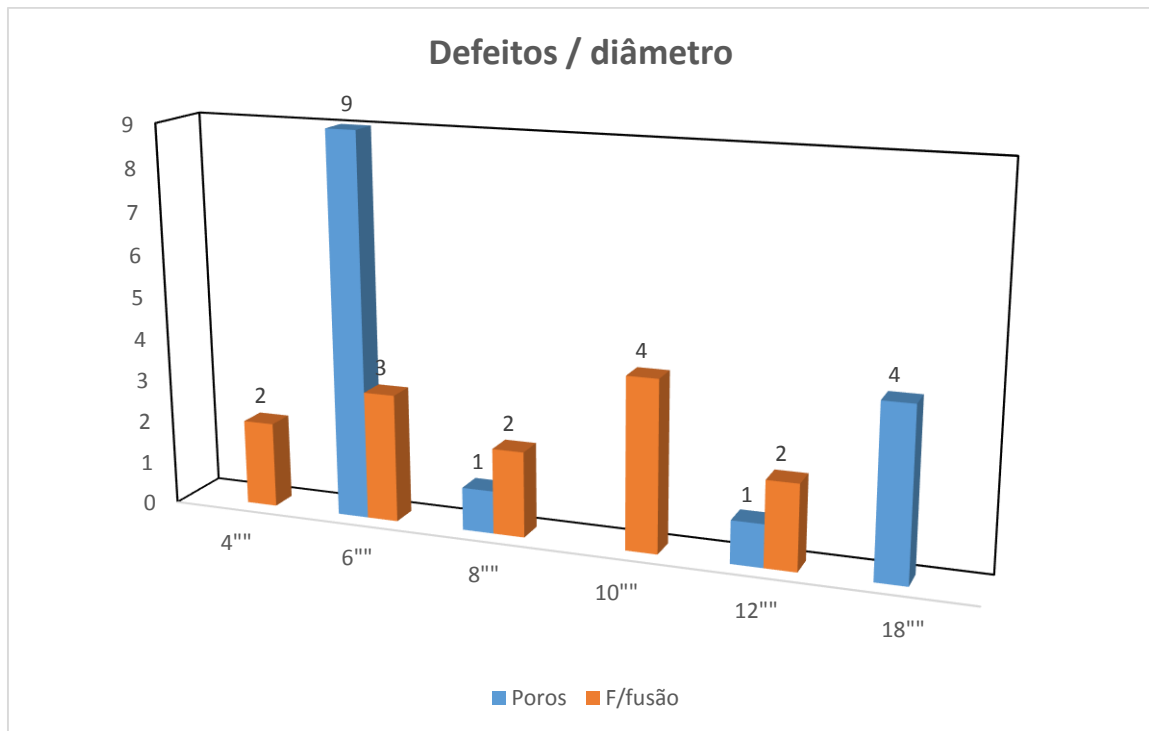


Figura 19 - Gráfico de defeitos

Ao analisar o gráfico, a maior incidência em diâmetros de 6 polegadas, apenas existe porque são estes os de maior produção. O defeito “poros” surge quando a velocidade aquando da soldadura é elevada, não permitindo a difusão dos gases pelo cordão, ou seja, é um factor diretamente sob a influência do soldador, razão para a ocorrência em todos os diâmetros.

Relativamente ao defeito “falta de fusão” como o termo já diz, refere-se á falta de fusão entre os materiais a serem soldados e o elétrodo. As razões poderão ser devido a aquecimento insuficiente, baixa intensidade de corrente ou tensão.

5. DESIGN OF EXPERIMENTS

Para analisar quais os parâmetros que mais influenciam a entrega térmica, pretende-se utilizar o método estatístico designado por DOE “Design of experiments” ou método Taguchi.

Segundo a ASQ (American Society for Quality), o DOE deverá ser utilizado quando mais do que um fator de entrada influencia o fator de saída, e pode ser usado para confirmar a suspeita das relações entre fatores de entrada e de saída e desenvolver uma fórmula exequível afim de determinar as relações. Assim, para abordar o problema pretendia-se utilizar o método Taguchi, visto que a utilização deste método se justifica quando um ou mais dados de entrada, influenciam o resultado final. Porém, como já mencionado, os ensaios não seguiram o método científico pelo que o objetivo em estabelecer relações entre os vários parâmetros e com base nos valores de durezas obtidos, determinar quais aqueles que do ponto de vista da eficiência do soldador mais afetam a soldadura.

Os parâmetros que influenciam uma soldadura e consequentemente afetam o resultado final da entrega térmica são: (Reginaldo Pinto Barbosa e outros – Junho 2013)

- Intensidade de corrente ou Amperagem (I)
- Diferença de potencial ou Voltagem (V)
- Tempo durante o qual se desenrola a soldadura (T)
- Velocidade de deslocação da tocha (v)

Os parâmetros (T)empo e (v)elocidade, são aqueles que estão mais dependentes da perícia do soldador, contudo a amperagem acarreta um aumento da temperatura nas zonas termicamente afetadas e por isso também elas influenciam o resultado final se bem que são parâmetros de *setup* nas máquinas e por essa razão são mais controláveis.

Ao pretender utilizar o método Taguchi, estabeleceríamos relações entre durezas da soldadura obtida com Amperagem (I), Voltagem (V), Tempo (T) e Velocidade (v) verificando quais os fatores que mais influenciam o resultado das durezas, sabendo-se que os fatores tempo e velocidade, não são possíveis de introduzir como *setup* nas máquinas, sendo dependentes da perícia do soldador.

5.1. MÉTODO TAGUCHI

A concepção e realização experimentais não são tarefas triviais, embora vários autores apresentem orientações para ajudar os investigadores e profissionais em planeamento, realização e análise de dados de estudos experimentais.

A gestão cuidadosa de questões estatísticas e não estatísticas é crucial para estudos de casos de sucesso. Por exemplo, a seleção é uma atividade crítica, porque ao usar-se um desenho experimental inadequado irá comprometer-se as conclusões do estudo. A solução que consiste em testar todas as combinações de variáveis independentes resulta num crescimento exponencial do número de testes a realizar quando aumenta o número de fatores de controlo ou o número de níveis que estes podem assumir. Por exemplo 3 fatores com dois níveis cada resultam em 2^3 testes, Tanco et al. (2009) centraram-se na seleção do delineamento experimental, destacando vários pontos-chave e fornecendo orientações para ajudar os profissionais na seleção de projetos experimentais que foram validados com base em exemplos da literatura.

Pretende-se explorar a relação entre a variável dependente (entrega térmica (ET)) e três variáveis independentes ou fatores de controlo (velocidade de soldadura, Intensidade corrente, Voltagem) que têm impacto sobre a mesma.

Sem a caracterização adequada do processo de soldadura, ou seja a não definição das variáveis de entrada (fatores de controlo), os resultados serão mais oriundos de uma arte de adivinhação do que baseados em métodos científicos.

A abordagem de um fator-em-um-tempo oferece vantagens apenas em condições excecionais (Frey & Wang, 2006), logo recomenda-se o uso de uma abordagem apoiada por técnicas estatísticas e matemáticas que tem prestado de forma inequívoca evidência da sua utilidade.

O Design of Experiments (DOE) é uma abordagem eficaz e bastante usada em investigações científicas e tecnológicas. As aplicações do DOE compreendem motores de aeronaves, quadros para bicicletas, motores elétricos, dispositivos médicos e processos tecnológicos.

Em ciclos de soldadura, os aplicativos não foram encontrados, pelo que esta abordagem aqui ilustrada, destina-se a investigar os fatores de controlo que mais diretamente afetam os fatores de saída da soldadura, tais como a entrega térmica e durezas do material após o ciclo térmico da soldadura.

5.2. EXPERIMENTAÇÕES / PROVAS

A conceção e a realização de experimentações não são tarefas triviais, embora vários autores apresentem orientações no sentido de ajudarem quer pesquisadores quer profissionais no planeamento, realização e análise de dados dos estudos.

A seleção dos planeamentos experimentais é uma atividade crítica. Ao usar um desenho experimental inadequado, podem-se comprometer as conclusões do estudo.

Para estudar três fatores de controlo, cada um com 3 níveis seria necessário realizar 27 testes para estudar todas as combinações, efetuando-se repetições de cada teste para avaliar a sua robustez.

Cada fator com três níveis corresponde a dois graus de liberdade que a matriz tem que acomodar para se realizar o estudo. Assim, a menor matriz da série $3n$ que permite realizar este estudo é a matriz $L9(3^4)$ (Tabela 4) que permite estudar (com 9 testes) até 4 fatores com 3 níveis cada.

Tabela 4 - Matriz $L9$ (permite estudar até 4 fatores com 3 níveis cada)

	Fatores			
teste	A	B	C	D
1	1	1	1	1
2	1	2	2	2
3	1	3	3	3
4	2	1	2	3
5	2	2	3	1
6	2	3	1	2
7	3	1	3	2
8	3	2	1	3
9	3	3	2	1

Considerando os fatores A=I; B=V; C=v, (não se atribui nenhum fator à coluna D), obtém-se o seguinte plano de experiências (Tabela 5).

Os níveis a definir para cada fator de acordo com os máximos e mínimos determinados, estão propostos na Tabela 6.

Tabela 5 – Definição de 3 níveis para cada fator de controle

Variáveis				
Nível	Código	I (amp)	V (volts)	v (mm/min)
Máximo	1	116	24.8	180
Ponto central	0	86.5	16.6	97.5
Mínimo	-1	57	8.4	15

Nesta tabela, estabelecemos os valores máximos e mínimos de cada uma das variáveis e determina-se o valor médio.

Assim e na sequência do raciocínio, obteríamos a tabela 6 de realização de ensaios, com as várias combinações dos valores determinados para cada um dos ensaios a realizar.

Tabela 6 – Fatores controle e valores resposta

Fatores de controle			Resposta	
I (A).	Tensão (V)	v (mm/min)	Entrega Térmica	Durezas
116,0	24,8	97,5		
86,5	8,4	180,0		
57,0	16,6	15,0		
86,5	8,4	15,0		
57,0	24,8	97,5		
86,5	16,6	180,0		
116,0	8,4	97,5		
116,0	16,6	15,0		
86,5	16,6	97,5		
86,5	16,6	97,5		
57,0	8,4	97,5		

Fatores de controlo			Resposta	
I (A).	Tensão (V)	v (mm/min)	Entrega Térmica	Durezas
57,0	16,6	180,0		
116,0	16,6	180,0		
86,5	24,8	15,0		
86,5	16,6	97,5		

Estes ensaios visam identificar qual a combinação de fatores e níveis que tornam o produto robusto face a variações do processo produtivo e de materiais (entre outros fatores de ruído). Tipicamente, é avaliada uma característica de resposta em cada estudo mas, neste caso, existem duas características de resposta que serão consideradas: entrega térmica e dureza.

Serão realizados 2 ou mais repetições de cada teste.

A coluna “Durezas” encontra-se em branco devido à impossibilidade física na empresa de repetir novamente os ensaios, desta vez, com base no método Taguchi.

Os valores indicados na coluna “Entrega Térmica” são resultantes da fórmula matemática já anteriormente indicada

Página Intencionalmente em Branco

6. CONCLUSÃO

O objetivo deste trabalho consistia em definir os valores mais corretos a introduzir nas máquinas de soldadura, com a finalidade de se minimizar o número de defeitos e as reparações daí resultantes.

Como foi mencionado, os ensaios realizados não obedeceram às recomendações da utilização do método Taguchi, nomeadamente a repetição de pelo menos duas vezes o mesmo ensaio e a parametrização recomendada pela tabela 5. Este tipo de experiências ligadas a procedimentos de setup é descrito como sendo a prática existente na empresa em estudo.

Como uma variável importante é a velocidade de soldadura e esta é dependente do soldador, teríamos assim uma fundamentação para definir valores máximos e mínimos da velocidade de deslocação, em função da intensidade de corrente e de tensão.

Para ultrapassar esta situação, há que desenvolver todo o processo desde o início com recurso a técnicas de planeamento de experiências propostas no Capítulo 5 experimentadas. Assim, a utilização do método Taguchi, como foi proposta no capítulo 5 será então objeto de trabalho futuro.

REFERÊNCIAS BIBLIOGRÁFICAS

Campanella, Jack, Principles of quality costs: principles implementation and use, ASQ, Milwaukee, 1999, ISBN 0-87389-443-X.

Dixon, Eatock, Meenan, & Morgan, 2006, Steinberg & Bursztyn, 2010 e Vlachogiannis, 2003, Aplicação do DOE em dispositivos médicos e processos tecnológicos.

ESAB (Elektriska Svetsnings Aktie Bolaget),
http://www.esabna.com/us/en/education/esab_university.cfm Jun 2016

Estudo da Influência dos Parâmetros de Soldagem do Processo Eléctrodo Tubular na Dureza da ZTA de um aço. - Reginaldo Pinto Barbosa e outros – Junho 2013

Gijo, E., & Scaria, J. (2012). Product design by application of Taguchi's robust engineering using computer simulation. *International Journal of Computer Integrated Manufacturing*, 25, 761–773. <http://dx.doi.org/10.1080/0951192X.2012.665186>

IshiKawa, Kaoru, Guide to Quality Control, 1971, Asian Productivity Organization

ISO (2008) NP EN ISO 9001 Sistemas de Gestão da Qualidade – requisitos

Jeang, A., Liang, F., & Chung, C. (2008). Robust product development for multiple quality characteristics using computer experiments and an optimization technique. *International Journal of Production Research*, 46, 3415–3439.
<http://dx.doi.org/1080/00207540601139963>

Juran, J. M. & Godfrey, A-B. (2000). Juran 's Quality Handbook (5 thed).

Kapil Banker, Amit Patel, Diptesh Patel, Implementation in Statistical Quality Control (SQC) in welded Stainless steel pipes manufacturing (vol. 3 Set. 2014) - Internacional Journal of Research in Engineering and Technology.

Lima, E., Ferreira, F. Reis, L. Cobaxo, R. Andrade, W. Barbosa, R. (2004), Estudo da Influência dos Parâmetros de Soldagem do Processo Eléctrodo Tubular na Dureza da ZTA de um Aço CrMo, Revista On-line Unileste, <http://www.unilestemg.br/revistaonline/> Volume 2, jul-dez. ISSN 18064973.

Millerwelds, Guidelines for Gas Tungsten Arc Weld (GTAW) (2013)

Ranjit K. Roy - Design of experiments using the Taguchi approach: 16 steps to product and process improvement, John Wiley & Sons, 2001

Richard L. Little, Welding and Welding Technology, cap 17, Tig Operation. Amazon January1,1973

Tappeta, Nagendra, & Renaud - Aplicações do DOE em motores de aeronaves,1999

UNE-EN 1011-2:2001 Recommendations for welding of metallic materials — Part 2: Arc welding of ferritic steels. The European Standard EN 1011-2:2001

Yousaf F. and Ikramullah Butts, S. – Reduction in Repair Rate of Welding Processes by Determination and Controlling of Critical KPIVs, 2013-07-23, International Journal of Production Management and Engineering